

Evolución geomorfológica en tiempos históricos recientes de cárcavas del borde del piedemonte norte del Guadarrama (Segovia, España). Estudio a partir de fuentes documentales

Geomorphic evolution in recent historic times of gullies located at the north piedmont of the Guadarrama Mountains (Segovia, Spain). An analysis from documentary sources of information

Fuencisla Vicente^{1*}, Miguel Angel Sanz², Ana Lucía², José Francisco Martín-Duque²

1. School of Biology, IE University, Campus de Santa Cruz la Real: C/Cardenal Zúñiga, 12, 40003, Segovia. MariaF.Vicente@ie.edu*

2. Departamento de Geodinámica, Fac. CC. Geológicas, UCM, C/José A. Novais s/n, 28040, Madrid.

PALABRAS CLAVE: Cárcavas, Evolución geomorfológica, Piedemonte norte del Guadarrama, Segovia.

KEY WORDS: Gullies, Geomorphic evolution, Northern Guadarrama piedmont, Segovia.

RESUMEN

Cerca del borde del piedemonte norte de la Sierra de Guadarrama (comarca de Pedraza, provincia de Segovia) existe un conjunto de formas erosivas en cárcavas bien definidas, desarrolladas sobre arenas silíceas del Cretácico Superior. En este trabajo se analiza la evolución geomorfológica en tiempos históricos recientes de esas cárcavas, realizada a través del análisis de diferentes fuentes documentales. Dicho trabajo ha revelado la escasez de datos y referencias históricas a estas formas del terreno. Los mejores resultados se han conseguido a partir de secuencias fotográficas de campo y de fotografías aéreas verticales de distintas fechas. La evolución geomorfológica experimentada por estas cárcavas a lo largo de los últimos sesenta años, establecida mediante el estudio comparativo de fotografías aéreas verticales de distintos años, ha puesto de manifiesto un retroceso de los bordes de las cárcavas, y por tanto un aumento de la superficie ocupada por sus cabeceras. En concreto, se han obtenido tasas máximas de retroceso de hasta 0,78 m/año. Ese retroceso ocurre sobre todo por procesos gravitacionales (caídas, deslizamientos y flujos), y en menor medida por erosión hídrica en surcos y regueros. Estos procesos coexisten con la colonización de la vegetación en el interior de las cárcavas, sobre todo arbórea y arbustiva. El aumento espontáneo de la cubierta vegetal que se ha registrado supera, en ocasiones, el 50% de su superficie; dicha colonización contribuye a la estabilidad geomorfológica de algunos sectores del interior de las cárcavas, al disminuir la actividad erosiva sobre sus paredes. Sobre el origen incierto de estas formas erosivas, se confirma, su relación con fenómenos inducidos por el hombre; sin embargo, no se ha podido constatar para todas ellas como causa única y común.

ABSTRACT

Near the edge of the Northern piedmont of the Guadarrama Mountains (at the surroundings of the Pedraza historic town, at the Centre-South of the province of Segovia), a series of slope gullies cut on silica sand, shale and gravel sediments of the Upper Cretaceous period are widespread. They occur on the slopes of a set of mesas and cuestas capped by more resistant rocks, limestones and dolostones. The objectives of this paper are to know whether these erosive forms have expanded during recent times or if, on the contrary, they are being healed and stabilized by vegetation colonization. For that, different documentary sources of information have been used. They revealed that there is a significant scarcity of data and of historic references about these erosive forms. The best results have been obtained from the multi-temporal aerial photographs and the field photographs. Based on the former source of information, a characterization of the geomorphological evolution of these gullies in recent historical times has been made. The comparative study from this source cover the last sixty years, and it has shown that there is a tendency towards the backwasting of the gullies' headcuts and headwalls, and therefore there is an extension of the catchment areas. According to this method, a maximum rate of backward movement of 0.78 m/year has been obtained. Additional field work shows how the headwalls are backwasting mainly due to mass movements and hydric erosion. Paradoxically, these active processes coexist with another tendency towards a stabilization and vegetation colonization of the inner areas of the catchments. Thus, spontaneous tree and shrub vegetation is spreading within the gullies, with rates of increasing vegetation cover as larger as of more than 50% in nearly 50 years. This is due to the fact that it is the factor of "colluvium presence" the one which allows a spontaneous recovery of the soil and the vegetation. Regarding the uncertain origin of these gullies, a direct relationship with historical human activities has been established for some of the studied gullies, but not for all of them. Historical human activities such as mining, quarrying and overgrazing widespread over this region from the Middle Ages, and they were very intense since the eighteenth century. According to a direct spatial association between very old limestone quarries and the occurrence of gullies, it is hypothesized that the former could have triggered the latter, but an unequivocal relationship could not be established.

1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica en cárcavas se ha convertido en un problema de ámbito mundial (VALENTIN

et al., 2005) debido a sus implicaciones tanto académicas como aplicadas. Por consiguiente, ha sido objeto de muchos estudios durante la última década (POESEN *et al.*, 2003; CASALÍ & JIMÉNEZ,

2007). Sin embargo, las referencias que aluden específicamente a cárcavas desarrolladas sobre depósitos de arenas y areniscas son escasas (LINDQUIST, 1980; CROUCH, 1990; OSTERKAMP & TOY, 1997; BOARDMAN *et al.*, 2003; NICHOLS, 2007). Esta circunstancia otorga gran interés al estudio de un conjunto de cárcavas ‘de ladera’ (*slope gullies*; CAMPBELL, 1989) formadas sobre arenas silíceas de edad Cretácico Superior, las cuales afloran a lo largo del borde del piedemonte norte de la Sierra de Guadarrama (provincia de Segovia). Estas formas del terreno son comunes, y están bien desarrolladas, en el entorno del valle del río Cega, en la comarca de Pedraza (DÍEZ & MARTÍN DUQUE, 2005).

Las cárcavas son pequeños valles de paredes y cabeceras verticalizadas y perfiles longitudinales de pendiente elevada, que transmiten flujos efímeros y están sujetos a una intensa erosión hídrica. Son formas del terreno que normalmente aparecen asociadas a litologías fácilmente erosionables (en este caso, arenas silíceas), y a regímenes climáticos con cierto grado de aridez. Algunas actividades humanas históricas como minería, cantería y sobrepastoreo, que se han desarrollado en estos lugares a partir de la Alta Edad Media y en épocas posteriores (de manera muy intensa desde el siglo XVIII), podrían haber originado y acelerado los procesos erosivos en dichas cárcavas (MORENO, 1989).

Los métodos de estudio utilizados para determinar cuál ha sido la evolución reciente de cárcavas son variados y diversos: comparación de mapas topográficos y cambios de usos del

suelo (GÁBRIS *et al.*, 2003); estudios de estratigrafía de alta resolución que incluyen estudios de campo, análisis de suelos y métodos de datación de carbón y de cerámica, así como estudios de documentación escrita a lo largo de la historia local (DOTTERWICH *et al.*, 2003; MIETH & BORK, 2005).

En este trabajo, y con el fin de determinar el origen y evolución en tiempos históricos recientes de estas cárcavas, así como sus posibles causas, se han seguido técnicas de trabajo históricas, cartográficas y fotográficas, contribuyendo a ampliar el marco temporal y las tendencias evolutivas, en las que se inserta el análisis de los procesos geomorfológicos activos en estas mismas cárcavas (descrito en otro trabajo que es complementario de éste LUCÍA *et al.*, 2008). Así mismo, un avance del presente estudio fue presentado en el 9º Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA 9) en diciembre de 2008 y aparece recogido en las Actas de dicho congreso (VICENTE *et al.*, 2009).

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Fig. 1) se sitúa en las proximidades de la Sierra de Guadarrama, en el borde de su piedemonte norte, en el sector oriental del Sistema Central (provincia de Segovia, Comunidad Autónoma de Castilla y León, España).

Las cárcavas se desarrollan sobre sedimentos detríticos (de aproximadamente 70 metros de espesor) de arenas silíceas, arcillas y gravas,

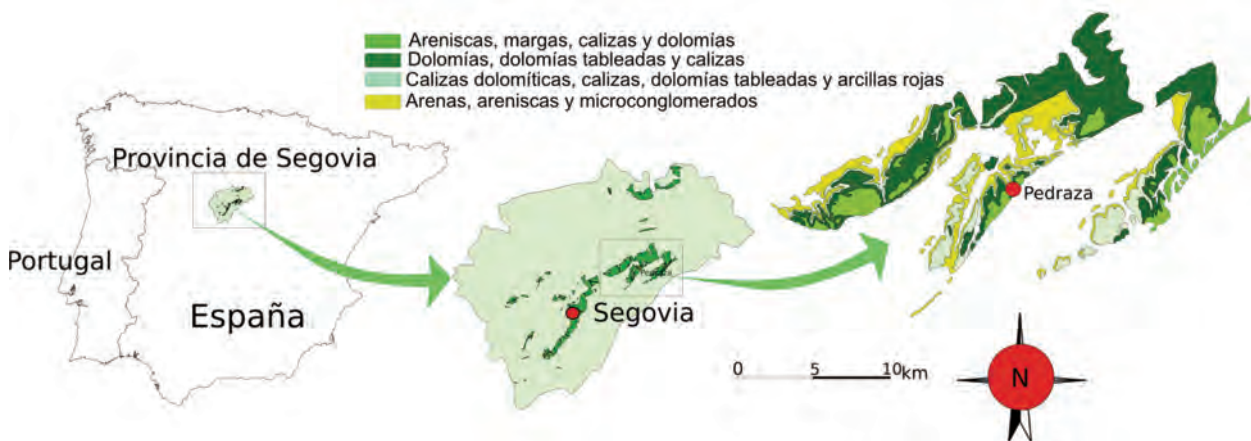


Fig. 1.—Ubicación del área de estudio. Afloramientos correspondientes a materiales del Cretácico Superior.
—Location of the study area. Outcrop of Upper Cretaceous materials.

correspondientes a las Formaciones Arenas de Utrillas, Arenas y Arcillas de Castro de Fuentidueña, y Arenas y Arcillas de Segovia, de edades Cenomaniense, Turoniense y Coniaciense respectivamente (ALONSO, 1981; ITGE, 1991; IGME, 2007). El relieve es típicamente estructural, con formas en cuevas y mesas. Las monteras que culminan estos paisajes tabulares están constituidas por rocas carbonáticas. Las laderas de las cuevas y mesas en su mayoría se encuentran recubiertas por depósitos coluvionares (bloques y cantos de caliza englobados en una matriz areno-arcillosa). Allí donde se desarrollan las cárcavas, el coluvión ha sido erosionado, quedando al descubierto los materiales detríticos.

Una buena parte del interior de las cárcavas se encuentra desprovisto de suelo, y en esos casos el sustrato arenoso y arcilloso queda expuesto en superficie, siendo extremadamente vulnerable a la erosión hídrica. Sobre los coluviones carbonáticos se desarrolla una asociación de suelos de cambisoles cálcicos y leptosoles réndzicos (FAO, 1998) y sobre las zonas acaravadas más arenosas aparecen suelos de tipo arenosol cámbico (FORTEZA *et al.*, 1987).

El clima en esta comarca se puede clasificar como “Mediterráneo Continentalizado de Templado a Frío” (MORENO, 1989). Se caracteriza por inviernos fríos y prolongados y una precipitación moderada, que llega a hacerse muy escasa durante el verano corto y cálido. Sin embargo, es en este periodo veraniego cuando tienen lugar tormentas convectivas muy intensas, localizadas sobre todo a finales de junio y principios de septiembre, que son responsables de la mayor actividad geomorfológica que ocurre dentro de las cárcavas objeto de estudio (LUCÍA *et al.*, 2008). Estos eventos extremos han sido identificados a partir de entrevistas con los habitantes de mayor edad de la zona (FAUSTINO MUÑOZ, comunicación personal) y a través de información histórica: en 1763, en Orejana, grandes lluvias produjeron prados acenagados por la arena, y en 1791, también en Orejana, enormes trombas de agua produjeron daños de alta consideración (MÍNGUEZ, 1992). Los efectos geomorfológicos de las tormentas convectivas sobre estas cárcavas también han podido ser comprobados directamente desde el inicio de un estudio sistemático de las mismas, comenzado a principios de 2007, momento a partir del cual se han registrado dos eventos extremos: el primero de ellos ocurrió el 25 de mayo de 2007, en el que una precipitación de 55 mm en 24 horas (sin registro de intensidad), produjo una erosión de 44,1 t/ha en el interior de una cárcava próxima a Pedraza (LUCÍA *et al.*, 2008); el segundo ocurrió el 9 de

septiembre de 2008, cuando una precipitación de 69,4 mm, con una intensidad máxima en 30 minutos de 72,4 mm/hora produjo una emisión de sedimentos superior a 115 t/ha en una cárcava próxima al núcleo de Orejana.

El uso que el hombre ha hecho del suelo en esta comarca ha sido muy intensivo desde hace al menos 1000 años, dando lugar a una notable modificación de los ecosistemas y del paisaje. De hecho, la actividad erosiva y sedimentaria asociada a actividades humanas fue importante aquí a partir del siglo XII, siendo aún más intensa a partir del XVIII (MORENO, 1989). Esos usos fueron desde la utilización más antigua de los recursos del monte, hasta aprovechamientos mineros para extraer arenas silíceas (arenas) y arcillas (antiguas tejas) de las laderas, así como rocas calizas de las culminaciones de mesas y cuevas (MORENO, 1989; GONZÁLEZ, 1992; MÍNGUEZ, 1999). Así mismo, el carboneo, el pastoreo y los cultivos fueron importantes, y favorecieron una progresiva deforestación (MORENO, 1989). En la actualidad estos usos del suelo han perdido importancia y las laderas se encuentran ahora cubiertas por una masa forestal mixta de encinas y sabinas, con el bosque de sabinas en claro proceso de recuperación. El interior de las cárcavas se encuentra, en general, poco provisto de vegetación arbórea, salvo algunos ejemplares aislados de pinos, —que ven claramente beneficiada su existencia por el sustrato arenoso—, así como sabinas y encinas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en este estudio ha consistido en el uso de distintas fuentes documentales (PEDRAZA *et al.*, 1996; Díez *et al.*, 2008), con el objetivo de obtener información geomorfológica relevante para conocer la variación en tiempos históricos recientes de las cárcavas de la comarca de Pedraza (Segovia).

3.1. Información vox populi y métodos históricos

Se incluyen en este epígrafe tanto testimonios directos como documentación histórica (PEDRAZA *et al.*, 1996; RIVAS, 1999; Díez *et al.*, 2008). En el primer caso se han utilizado una docena de descripciones y conversaciones (mediante entrevistas orales) realizadas con habitantes de localidades de la zona de estudio (El Arenal, Arahetes, Pedraza, El Valle de San Pedro, Torreval de San Pedro y Orejanilla), siempre orientadas a obtener información geomorfológica relevante. En el segundo caso se ha llevado a cabo una recopilación de

Tabla-I.-Mapas topográficos de distintas fechas y escalas que han sido comparados con el fin de detectar variaciones geomorfológicas en las cárcavas de la comarca de Pedraza.

–Topographical map sources, of different dates and scales, which have been compared with the aim of detecting geomorphic variations of the gullies of the Pedraza area, Segovia province.

Mapa N° hoja	Escala	Organismo	Fecha
Prádena 458-I	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 1999. Vuelo fotogramétrico del año 1997
Robregordo 458-II	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 1999. Vuelo fotogramétrico del año 1997
Navafria 458-III	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 1999. Vuelo fotogramétrico del año 1997
Turégano 457-II	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 2002. Vuelo fotogramétrico del año 1997
Collado Hermoso 457-IV	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 2002. Vuelo fotogramétrico del año 1997
Cabezuela 430-IV	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 2002. Vuelo fotogramétrico del año 1998
San Pedro de Gaillos 431-III	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 2002. Vuelo fotogramétrico del año 1998
Villarejo 431-IV	1:25.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	2ª edición, 2002. Vuelo fotogramétrico del año 1998
Turégano 457	1:50.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Datos de 1940; Editado en 1981
Prádena 458	1:50.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Datos de 1943; Editado en 1981
Plano del término de Pedraza. Hoja 1-Polígono 2	1:5.000	Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria (CGCCT, 1941). Gerencia Territorial. Ministerio de Economía y Hacienda	1941
Plano del término de Arahetes. Polígono 6	1:2.000	Dirección General de Estructuras Agrarias. Junta de Castilla y León. Consejería de Agricultura y Ganadería (JCYL, 1990)	1990

información en bibliotecas y archivos de Segovia y Madrid, también con el mismo objetivo.

3.2. Documentación cartográfica

Se han comparado cartografías de distintas fechas y escalas (Tabla I), con el fin de detectar variaciones en el relieve (Fig. 2).

Por otro lado, también se ha analizado en detalle la toponimia reflejada en distintas fuentes

cartográficas, ya que ésta ofrece información muy valiosa, no sólo de conocimientos geológicos básicos (como sugiere GARCÍA & SALCEDO, 2008), sino también con respecto a usos del suelo que pueden denotar movimientos de tierras, o sobre geomorfología en general.

Asimismo se ha recopilado información y datos sobre actividades mineras y extractivas que han supuesto movimientos de tierras y que a su vez han podido influir en la formación y/o varia-

ción morfológica de las cárcavas. Para ello se han seguido varias líneas de documentación: consulta de los expedientes del registro que el catastro minero tiene en Segovia (Sección de Minas en la Delegación Territorial de Segovia de la Junta de Castilla y León); selección de datos a partir de bibliografía específica de la zona; información del Mapa Geológico y Minero de Castilla y León (SIEMCALSA, 1997); y topónimos de los mapas del IGN (1981, 1999 y 2002). Toda esta información se ha contrastado con la comprobación en campo de la localización de cárcavas y huecos mineros actuales. En total, se han recopilado

registros de 11 canteras de arenas y/o caliza que están o han estado en explotación en la zona de estudio en los últimos años (desde 1963). Así mismo se han conseguido datos sobre antiguas explotaciones, sobre todo de calizas en las cabeceras de algunas cárcavas. En campo, se ha podido comprobar la existencia de evidencias claras de cantería (extracción de calizas) en las monteras que culminan las cárcavas, o la extracción de arenas y arcillas en el interior de un total de 15 de 75 cárcavas inventariadas (LUCÍA *et al.*, 2008), lo que supone aproximadamente un 20% de las analizadas (Fig. 3, 4 y 5).

Tabla-II.—Detalles de las fotografías aéreas verticales y ortoimágenes utilizadas para comparar la evolución histórica reciente de las cárcavas de la comarca de Pedraza.

—Details of the aerial photographs and ortoimages used for the comparison of the recent historical evolution of the gullies of the Pedraza area, Segovia province.

Fecha vuelo	Escala	Fuente	Características
Fotografías aéreas verticales			
1946	Aproximadamente 1/45.000	Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire; (CECAF-EA, 1946)	Formato digital; blanco y negro
08/09/1956	1/33.000	CECAF-EA (1956)	Formato papel fotográfico, posteriormente escaneadas; blanco y negro
24/08/1956	1/31.000	CECAF-EA (1956)	Formato papel fotográfico, posteriormente escaneadas; blanco y negro
ago-79	1/18.000	Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 1979); Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional	Formato papel fotográfico, posteriormente escaneadas; blanco y negro
ago-79	1/18.000	CNIG (1979)	Formato papel fotográfico, posteriormente escaneadas; blanco y negro
01/09/2002	1/40.000	CNIG (2002)	Formato papel fotográfico, posteriormente escaneadas; color
16/08/2002	1/40.000	CNIG (2002)	Formato papel fotográfico, posteriormente escaneadas; color
Ortoimágenes georreferenciadas a coordenadas UTM (Datum ED-50)			
2004	---	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), IGN (2004)	Color
2004	---	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), IGN (2004)	Color

A su vez, se han recopilado datos sobre repoblaciones forestales llevadas a cabo en la zona (*Atlas Forestal de Castilla y León*, entrevistas con guardas forestales, datos del catastro, etc.) las cuales pudieran haber supuesto movimientos de tierras, y por tanto haber intervenido en el origen o aumento de las cárcavas.

3.3. Otra documentación gráfica (fotografías analógicas y fotografías aéreas verticales)

Partiendo de un conjunto de fotografías analógicas antiguas que ha sido posible recopilar, se han vuelto a fotografiar los mismos lugares (en 2008), y se han interpretado los cambios ocurridos en términos de estabilidad o inestabilidad geomorfológica (Fig. 3 y 4; Fig. 6 y 7; Fig. 8 y 9).

Por otro lado, se ha realizado un estudio sobre la evolución geomorfológica de las cárcavas

mediante el análisis y comparación de pares estereoscópicos de fotografías aéreas verticales escaneadas (Tabla II) y de ortoimágenes georreferenciadas (adquiridas a través del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea-PNOA-IGN, 2004), que abarcan una diferencia de tiempo máxima de 58 años. Para ello, se ha cartografiado el borde de varios conjuntos de cárcavas, hasta donde la escala de la fotografía lo ha permitido, y se ha comparado su evolución en el tiempo, tal y como ya hicieran antes otros autores para otras zonas de España (PERES & GARCÍA-HIDALGO, 2006; MARTÍNEZ-CASASNOVAS *et al.*, 2007; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, 2007).

Más en detalle, el procedimiento ha sido el siguiente: en primer lugar se ha realizado una revisión exhaustiva de todas las cárcavas de la comarca, con el fin de localizar aquellas en las que apareciesen puntos de control claros (cruces

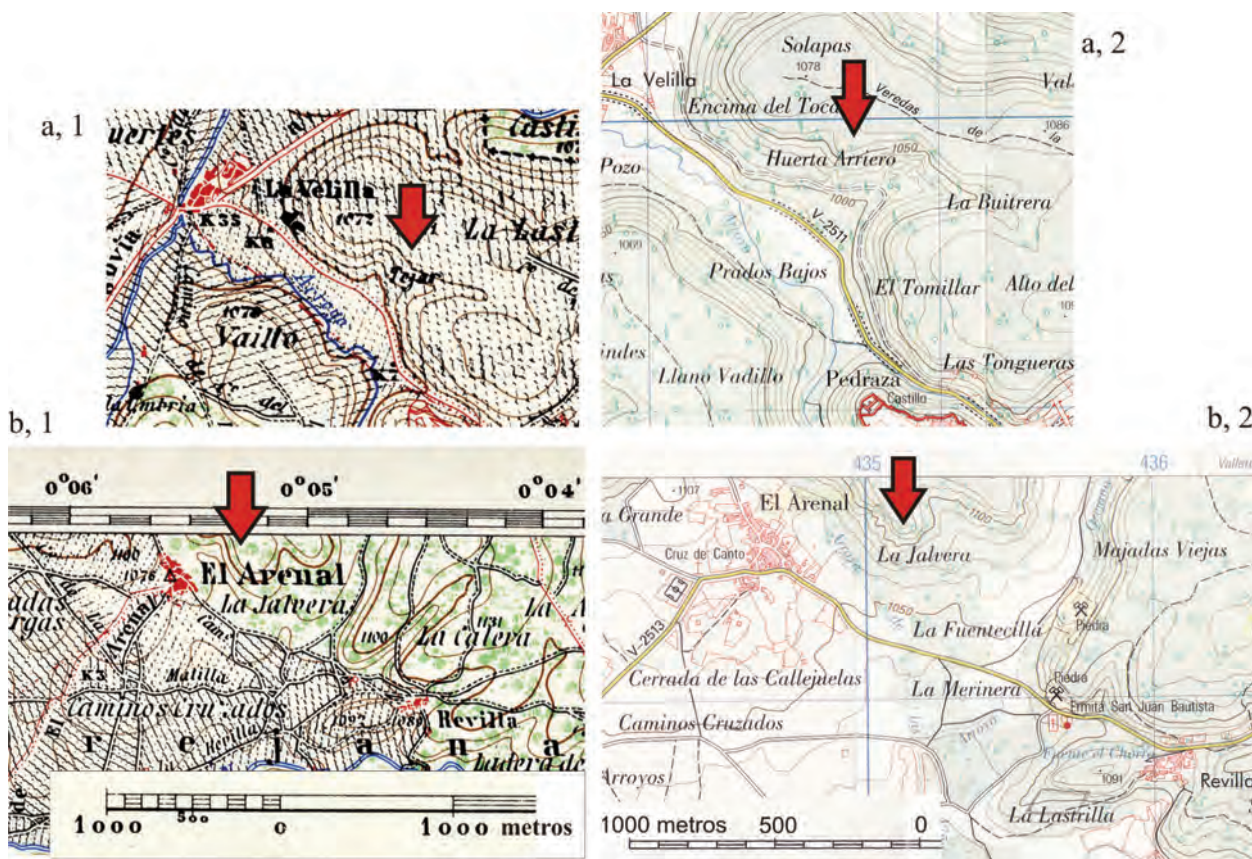


Fig. 2.—Selección de dos ejemplos de representación cartográfica de cárcavas actuales y topónimos asociados (a, entorno de Pedraza; b, proximidades de El Arenal) en dos mapas topográficos de distintas fechas (1, hoja 458 a escala 1:50.000 del año 1943; 2, mapa topográfico 458-I de escala 1:25.000 del año 1999).

—Selection of two examples of cartographic representation of existing gullies and their associate toponyms (a, surroundings of Pedraza; b, surroundings of El Arenal) in two topographical maps of different dates (1, 458 sheet, 1:50.000 scale, of the year 1943; 2, 458-I sheet, 1:25.000 scale, year 1999).

de caminos, vallas, etc.) que sirvieran de referencia en el solapamiento posterior de imágenes. Este análisis se ha concretado para dos áreas:

- Área 1-Pedraza: varias cárcavas en la margen izquierda de la carretera que comunica las localidades de La Velilla y Pedraza. Coordenadas UTM: 431000-432000 y 4554000-4555000 (Huso 30, Datum ED50); hoja 458-I (Prádena), escala 1:25.000.
- Área 2-Arahuetes: cárcavas en el entorno de Arahuetes, en la margen izquierda del camino que une las localidades de Arahuetes y Requirajada. Coordenadas UTM: 428000-429000 y 4553000-4554000 (Huso 30, Datum ED50); hoja 458-I (Prádena), escala 1:25.000.

A través del programa CartaLinx se ha digitalizado el contorno de las cárcavas para cada año (vuelo), así como las áreas claramente visibles cubiertas de vegetación. A continuación, se han georreferenciado todas las fotografías con las ortoimágenes del año 2004. Posteriormente, se han solapado y reajustado las sucesivas imágenes. Finalmente, la información obtenida se ha transferido a ArcView 3.2.a, en donde se ha llevado a cabo el análisis espacial comparativo (cálculo de áreas, longitudes y diferencias areales entre polígonos, ver Fig. 10, 11, 12, 13 y 14).

4. RESULTADOS

Tanto la información *vox populi* como los métodos históricos no han producido aportaciones adicionales a las ya recogidas por MORENO (1989), de manera que este trabajo sigue constituyendo la aproximación más válida en este sentido.

Respecto a la comparación de cartografías de distintas fechas, tampoco se han obtenido datos significativos sobre variaciones del relieve, probablemente debido al trazo suavizado de las curvas de nivel en los mapas más antiguos, y a la escala de los mapas disponibles, que no ha permitido identificar variaciones tan pequeñas (Fig. 2).

El análisis de los datos toponímicos apoya la idea de que ha existido influencia antrópica en el origen y la evolución de determinadas cárcavas. Varios términos reflejan las formas acarreadas del paisaje, lo que hace suponer de su existencia, al menos, desde tiempos históricos recientes. Otros indican cambios en los usos del suelo y movimientos de tierras pero no se puede precisar si fueron anteriores o posteriores a las cárcavas (Fig. 2, términos como Tejar o El Arenal).

En relación con actividades mineras y extractivas, se han localizado numerosas explotaciones antiguas de calizas en el borde de las monteras



Fig. 3 y 4.—Evolución geomorfológica reciente de una cantera próxima a la Iglesia de San Juan Bautista, en Orejana (Segovia). Cuando no existen medidas de restauración, la actividad de los procesos geomorfológicos activos en estos espacios hace que evolucionen hacia laderas acarreadas, con taludes de derrubios. (3) Fotografía realizada en 1991: en el frente de explotación más moderno (posterior a los años 60) se observan entradas de galerías de explotaciones más antiguas. (4) Año 2008: los procesos gravitacionales y de erosión hídrica han cubierto dichas entradas.

—Recent geomorphological evolution of a quarry located near the San Juan Bautista's Church, in Orejana (Segovia). When reclamation measurements are lacking, geomorphic processes are very active, so that they tend to evolve towards gullied slopes with talus slopes. (3) 1991 photograph: the highwall (quarried after the 1960's years) shows ancient galleries of sand exploitation. (4) Year 2008: the gravitational and water erosion processes at the highwall have covered the gallery entrances.

(Fig. 5), y se ha comprobado que existe una asociación espacial clara entre estas explotaciones y la existencia de cárcavas aguas debajo de las mismas. Por ello, es posible que dichas explotaciones pudieran desencadenar la formación de algunas de estas cárcavas (como ya apuntara MORENO, 1989). Esta hipótesis se ve reforzada por dos evidencias adicionales: (1) que la presencia de cárcavas no atiende a criterios topográficos o geomorfológicos (como pudiera ser su aparición en zonas de con-

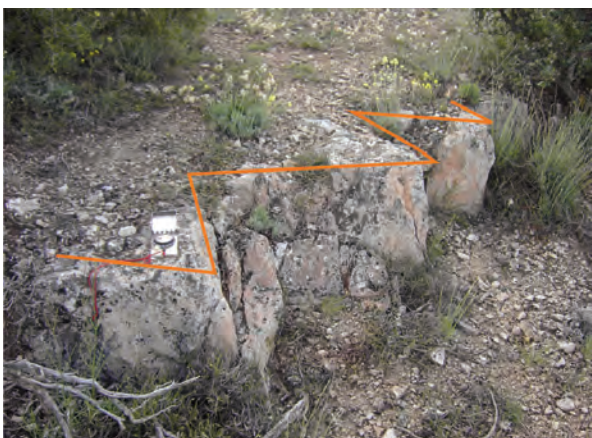


Fig. 5.—Marcas de antiguas extracciones de rocas en la culminación de las monteras de rocas carbonáticas de mesas y cuestras. Estas marcas muestran la extracción a favor de líneas preferentes de fracturación de las calizas, originando una forma característica en “picos” (señalada con la línea naranja). Este estudio ha puesto de manifiesto que existe una asociación directa entre la localización de estas morfologías y la ocurrencia de cárcavas aguas abajo.

—Marks of areas of old quarrying of carbonatic rocks, at the carbontatic cap of mesas and cuestras. Those marks show their extraction following the main fractures lines of limestones (depicted by an orange line). This study has proved how there is a spatial pattern between the location of these quarries and the appearance of gullies downslope.

centración de escorrentía); (2) la presencia de antiguas canteras y cárcavas es dominante en la proximidad de los núcleos urbanos (Arahetes, Alameda, Orejanilla, Orejana, La Revilla, etc.).



Fig. 6 y 7.—Ladera acarcavada próxima a la localidad de El Arenal. (6) Copia escaneada, facilitada por Ángela Alonso (fotografía de 1981). La flecha señala una raíz expuesta como referencia en ambas fotografías. (7) Fotografía digital, realizada en 2008. En los interfluvios interiores (círculo amarillo) se observa un mayor rebajamiento de los mismos por erosión laminar y en surcos (*rills*). En el interior de la cárcava se contabilizan al menos tres pies arbóreos que se han desarrollado espontáneamente durante estos 27 años.

—Gullies near El Arenal. (6) Scanned copy of a picture by Angela Alonso, taken in 1981. The arrow marks a exposed root as a reference for both photographs. (7) Digital photograph, taken in 2008. At the inner divides (yellow circle), a significant topographical reduction, by sheet and rill erosion, can be observed. Inside the gully, there are at least three trees developed spontaneously during the last 27 years.

También se observan explotaciones de arenas y/o arcillas de épocas recientes (mediados del siglo XX), que en la actualidad están evolucionando a cárcavas (Fig. 3 y 4), lo que refuerza la hipótesis de que a partir de zonas extractivas pueda existir una evolución hacia cárcavas.

La información sobre repoblaciones forestales localizada aparece dispersa y sin actualizar. No se han encontrado evidencias de repoblaciones antiguas, y por tanto de movimientos de tierras asociados a localizaciones sobre las que actualmente se ubican las cárcavas. Por otro lado, la colonización progresiva de la vegetación en el interior de las cárcavas es bastante evidente, al menos, en muchas de ellas y parece que ha tenido lugar de forma espontánea, debido a la disminución del pastoreo. El *Atlas Forestal de Castilla y León* de 2007 (GIL & TORRE, 2007) cifra el incremento de arbolado denso en esta región, para los últimos 35 años, en un 13,33%, aproximadamente.

El análisis comparativo de fotografías de diferentes años, tanto analógicas como aéreas verticales, ha ofrecido buenos resultados. En el caso de las fotografías aéreas verticales, la principal limitación ha sido la escala de las fotografías, debido al pequeño tamaño de las cárcavas.

A partir de las secuencias fotográficas de campo, ha sido posible identificar variaciones morfológicas significativas en tiempos históricos recientes, como resultado de procesos erosivos (Fig. 6 y 7). También ha sido posible constatar cómo se están formando nuevos suelos a partir de coluviones que recubren el interior de algunas cárcavas. En muchas de ellas, la colonización espontánea de la



Fig. 8 y 9.—(8) Fotografía del año 1990 escaneada del libro de MÍNGUEZ (1992), donde se observa una cárcava al fondo del pueblo de Orejanilla. (9) Fotografía realizada en 2008 con cámara digital, correspondiente a la misma cárcava, en cuyo interior se aprecia ahora un aumento muy significativo de la vegetación, que ha colonizado de forma espontánea la zona acarcavada.

—(8) Scanned photography included in MÍNGUEZ (1992), where it can be seen a gully at the background of the Orejanilla village. (9) Photograph taken in 2008 with a digital camera of the same gully; the interior of the gully has experienced a noticeable increase of vegetation, which has spontaneously colonized this area.

vegetación es evidente (Fig. 8 y 9). Con este método se ha comprobado cómo coexisten procesos erosivos y de colonización vegetal en el interior de las cárcavas.

A partir del análisis de las secuencias de fotografías aéreas verticales se ha cuantificado cómo en el Área 1-Pedraza, el total de superficie expuesta a la erosión en el interior de las cárcavas es de un 50% ($10.221,77 \text{ m}^2$ de un total de superficie acarcavada de $20.297,84 \text{ m}^2$). Las máximas tasas de retroceso calculadas llegan en algunos casos hasta los $0,78 \text{ m/año}$. La media de retroceso corresponde a $0,29 \text{ m/año}$ (Fig. 10). En el Área 2-Arahetes, tan sólo un 32% de la superficie del interior de las cárcavas está sujeta a erosión hídrica y a procesos gravitacionales (la superficie arenosa y sin vegetación, expuesta a la erosión, es de $10.177,66 \text{ m}^2$ y la superficie total acarcavada es de $31.703,48 \text{ m}^2$). Las tasas máximas de retroceso de ladera en este caso alcanzan los $0,72 \text{ m/año}$, siendo la media en estos últimos 58 años de $0,31$

m/año (Fig. 11). Por tanto, en ambas áreas se observan tasas de retroceso de las paredes de las cárcavas muy similares, aunque en el Área 2-Arahetes, la superficie expuesta a la erosión es, en proporción, bastante menor que en el Área 1-Pedraza: todo ello a pesar de que la tasa media de retroceso sea superior.

En cuanto al aumento de cubierta vegetal arbórea y arbustiva, y a la formación de una cubierta edáfica en el interior de las cárcavas estudiadas, se ha calculado que ha sido de aproximadamente un 49% en el Área 1-Pedraza (Fig. 12) y de alrededor de un 58% en el Área 2-Arahetes (Fig. 13). Estos datos determinan que la colonización por vegetación arbórea y arbustiva del interior de las cárcavas en el Área 2-Arahetes es mayor que en el Área 1-Pedraza. Este aumento de la cubierta vegetal podría ser el principal factor que contribuye a la disminución de la superficie expuesta a procesos erosivos, y por tanto a la estabilización de las laderas; sin embargo, a la

vista de los datos, no es el único factor que influye, pues en este tipo de morfologías intervienen también otros factores como la pendiente de la ladera, la litología o la intensidad de la lluvia (MARTÍNEZ-CASASNOVAS *et al.*, 2007).

También se observa un claro patrón de diferencias según la orientación (Fig. 15). En el interior de un 44% del total de 75 cárcavas descritas y estudiadas en esta zona (LUCÍA *et al.*, 2008), la vegetación coloniza las laderas orientadas hacia el norte, noreste y noroeste, mientras que las laderas orientadas al sur sufren un proceso de rebajamiento y erosión mucho más acusado (Fig. 16). Probablemente este fenómeno se debe al efecto microclimático de la exposición solar, con una solana térmicamente más cálida y, por ello, menos húmeda y con menos cubierta vegetal lo que, a su vez, favorece el proceso de erosión.

5. CONCLUSIONES

Sobre el origen de estas cárcavas del piedemonte norte del Guadarrama, se han completado y documentado algunas de las aportaciones señaladas por MORENO (1989). Específicamente, se ha constatado una asociación espacial clara entre antiguas canteras de caliza y el desarrollo de cárcavas aguas debajo de las mismas. Por ello, el origen y evolución de muchas cárcavas de esta comarca parece estar relacionado con la acción antrópica a través del tiempo. Sin embargo, no se ha podido confirmar como causa única y común para todas ellas.

Respecto a la evolución geomorfológica en tiempos históricos recientes, la comparación de fotografías analógicas y aéreas verticales de distintas fechas es el método que ha aportado información más relevante.

La interpretación sobre esta evolución histórica muestra cómo los procesos de erosión hídrica concentrada (en *rills* y en *gullies*) y los procesos gravitacionales siguen actuando, sobre todo en las cabeceras y en las paredes de las cárcavas (zonas geomorfológicamente más activas). Simultáneamente, la formación de suelo y el paulatino aumento de la vegetación también son evidentes en el interior de las cárcavas, lo que llevaría a pensar que la vegetación está logrando estabilizar estas cárcavas. Sin embargo, la colonización vegetal no parece ser un factor suficiente como para anular los procesos erosivos que ocurren en el interior de este tipo de formas del terreno, como señalan MARTÍNEZ-CASASNOVAS *et al.* (2007); sobre todo bajo la influencia de determinadas condiciones, pues también influyen de manera decisiva

otros factores. En este caso, el principal factor de inestabilidad es la alta erosibilidad que tienen las litologías arenosas expuestas en el interior de las cárcavas, cuya colonización vegetal no llega a producirse a menos que queden recubiertas por material coluvionar.

En definitiva, a partir del estudio de fuentes documentales ha sido posible constatar la coexistencia en el interior de las cárcavas de procesos geomorfológicos muy activos con otros de tendencia a la estabilización por colonización vegetal.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se está llevando a cabo en el marco del proyecto de investigación CGL2006-07207 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Los autores manifiestan un recuerdo muy especial a Andrew E. Godfrey, fallecido en agosto de 2006, cuya colaboración en la puesta en marcha de este proyecto fue determinante. Así mismo, agradecen la documentación aportada por Fernando Moreno y Ángela Alonso, la ayuda prestada por el personal de los diversos archivos y bibliotecas consultados, así como la colaboración, a través de testimonios directos, de numerosas personas de la comarca. En todos los casos, su contribución ha sido decisiva para la elaboración del presente estudio. Finalmente, Fernando Moreno y un revisor anónimo contribuyeron a mejorar notablemente el resultado del manuscrito original.

Recibido el día 21 de abril de 2009

Aceptado el día 2 de septiembre de 2009

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, A. 1981. El cretácico de la provincia de Segovia (borde norte del Sistema Central). *Seminarios de Estratigrafía*, 7:1-271.
- BOARDMAN, J., PARSONS, A.J., HOLLAND, R., HOLMES, P.J. & WASHINGTON, R. 2003. Development of badlands and gullies in the Sneeuberg, Great Karoo, South Africa. *Catena*, 50 (2-4): 165-184.
- CAMPBELL, I.A. 1989. Badlands and badland gullies. In: D.S.G. THOMAS, Ed., *Arid Zone Geomorphology*, págs. 159-183. Belhaven Press. London.
- CASALÍ, J. & GIMÉNEZ, R. (Eds.) 2007. *Progress in Gully Erosion Research*. 141 págs. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- CECAF-EA, 1946, 1956. *Fotografías aéreas verticales*. Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire. Madrid.
- CGCCT, 1941. *Plano del término de Pedraza 1:5.000*. Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria.

- Gerencia Territorial. Ministerio de Economía y Hacienda. Madrid.
- CNIG, 1979, 2002. *Fotografías aéreas verticales de distintas escalas y años*. Centro Nacional de Información Geográfica. Ministerio de Fomento. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- CROUCH, R.J. 1990. Erosion Processes and rates for gullies in granitic soils Bathurst, New South Wales, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**:169-173.
- DÍEZ, A., LAÍN, L. & LLORENTE, M. 2008. *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. 190 págs. Publicaciones del IGME. Serie Riesgos geológicos/Geotecnia nº 1. Madrid.
- DÍEZ, A. & MARTÍN DUQUE, J.F. 2005. *Las raíces del paisaje. Condicionantes geológicos del territorio de Segovia*. 464 págs. Junta de Castilla y León. Segovia.
- DOTTERWEICH, M., SCHMITT, A., SCHMIDTCHEN, G. & BORK, H.R. 2003. Quantifying historical gully erosion in northern Bavaria. *Catena*, **50** (2-4): 135-150.
- FAO 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. 88 págs. 84 World Soil Resources Reports. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. (www.fao.org/docrep/W8594E/W8594E00.htm)
- FORTEZA, J., LORENZO, L.F., NAJAC, N., et al. 1987. *Mapa de Suelos de Castilla y León*. Memoria y Mapa 1:500.000. 98 págs. Junta de Castilla y León. Valladolid.
- GÁBRIS, GY., KERTÉSZ, Á., ZÁMBÓ, L. 2003. Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment. *Catena*, **50** (2-4): 151-164.
- GARCÍA, J.M. & SALCEDO, M.C. 2008. Toponímicos: Una ventana al conocimiento geológico. In: A. CALONGE, L. REBOLLO, M.D. LÓPEZ-CARRILLO, A. RODRIGO & I. RÁBANO, Eds., *Actas del XV simposio sobre enseñanza de la Geología. Cuadernos del Museo Geominero, nº II*. págs.177-185. IGME. Madrid.
- GIL, L. & TORRE, M., Eds. 2007. *Atlas Forestal de Castilla y León*. 2 vol.: vol. I 388 págs., vol. II 492 págs. Junta de Castilla y León. Consejería de Medio Ambiente. Valladolid.
- GONZÁLEZ, M. 1992. *La sombra del enebro. Meditación de la tierra de Pedraza*. 530 págs., Ediciones Castellanas. Segovia.
- IGME 2007. *Mapa Geológico de España 1:50.000 (Sepúlveda, Hoja nº 431)*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- IGN 1981. *Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:50.000 (Turégano, Hoja nº 457; Prádena, Hoja nº 458)*. 1ª edición. Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- IGN 1999. *Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:25.000 (Hojas nº 458-I; 458-II; 458-III)*. Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- IGN 2002. *Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:25.000 (Hojas nº 430-IV; 431-III; 431-IV; 457-II; 457-IV)*. 2ª edición. Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- IGN 2004. *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)*, Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- ITGE 1991. *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Prádena, Hoja nº 458)*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- JCYL, 1990. *Plano del término de Arahuetes a escala 1:2.000*. Consejería de Agricultura y Ganadería. Dirección General de Estructuras Agrarias. Junta de Castilla y León. Valladolid.
- LINDQUIST, R.C. 1980. *Slope processes and forms at Bryce Canyon National Park*. Ph.D. Thesis. 132 págs. University of Utah. Utah.
- LUCÍA, A., VICENTE, F., MARTÍN MORENO, C., MARTÍN DUQUE, J.F., SANZ, M.A., DE ANDRÉS, C. & BODOQUE, J.M. 2008. Procesos geomorfológicos activos en cárcavas del borde del piedemonte norte de la Sierra de Guadarrama (Provincia de Segovia, España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, **102** (1-4): 47-69.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. 2007. When did gully erosion start to be accelerated in the Penedès-Anoia vineyard region (NE Spain)? In: J. CASALÍ & R. GIMÉNEZ, Eds. *Progress in Gully Erosion Research*, págs.82-83. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., GARCÍA-HERNÁNDEZ, D. & RAMOS, M.C. 2007. Does vegetation cover suppose gully erosion stabilization? In: J. CASALÍ & R. GIMÉNEZ, Eds. *Progress in Gully Erosion Research*. págs.78-79. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- MIETH, A. & BORK, H.R. 2005. History, origin and extent of soil erosion on Easter Island (Rapa Nui). *Catena*, **63**: 244-260.
- MÍNGUEZ, L. 1992. *Orejana: historia de un pueblo*. 294 págs., Asociación Cultural San Ramón. Orejana (Segovia).
- MÍNGUEZ, M. 1999. *Torre Val de San Pedro - El Valle: historia, vida, costumbres y ...* 277 págs., Artes Gráficas Cañada, S.L. Madrid.
- MORENO, F. 1989. *Zonas kársticas en la vertiente N de la Sierra de Guadarrama*. 773 págs. Tesis Doctoral nº 105/89. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- NICHOLS, M.H. 2007. The Walnut Gulch experimental watershed – 50 years of watershed monitoring and research. In: DE GRAAFF, J., CAMERON, J., SOMBATPANIT, S., PIERI, C., & WOODHILL, J., Eds. *Monitoring and Evaluation of Soil Conservation and Watershed Development Project*. 496 págs. World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok.
- OSTERKAMP, W.R. & TOY, T.J. 1997. Geomorphic considerations for erosion prediction. *Environmental Geology*, **29** (3-4): 152-157.
- PEDRAZA, J., CARRASCO, R.M., DÍEZ, A., MARTÍN DUQUE, J.F., MARTÍN RIDAURA, A., & SANZ SANTOS, M.A. 1996. *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. 414 págs. Rueda. Madrid.
- PERES, A. & GARCÍA-HIDALGO, J.F. 2006. Morfología, procesos erosivos y evolución reciente en una cárcava cuaternaria: El barranco Haza de la Viña, Uceda (Guadalajara, España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica)*, **101** (1-4): 41-50.
- POESEN, J., NACHTERGAELE, J., VERSTRAETEN, G., VALENTIN, C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, **50** (2-4): 91-113.
- RIVAS, P. 1999. Documentación y archivos: Fuentes documentales para la intervención en el patrimonio arquitectónico y urbanístico. *Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid*, **VIII**: 3-5.
- SIEMCALSA 1997. *Mapa Geológico y Minero de Castilla y León a escala 1:400.000*. 484 págs. Junta de Castilla y León. Valladolid.
- VALENTIN, C., POESEN, J., LI, Y. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, **63** (2): 132-153.
- VICENTE, M. F., LUCÍA, A., SANZ, M.A., et al. 2009. Origen, evolución y dinámica actual de cárcavas del piedemonte norte del Guadarrama. Métodos de estudio y criterios para su gestión con bases ecológicas. *Comunicaciones Técnicas CONAMA9, el reto es actuar*. Fundación CONAMA.(www.conama9.org)

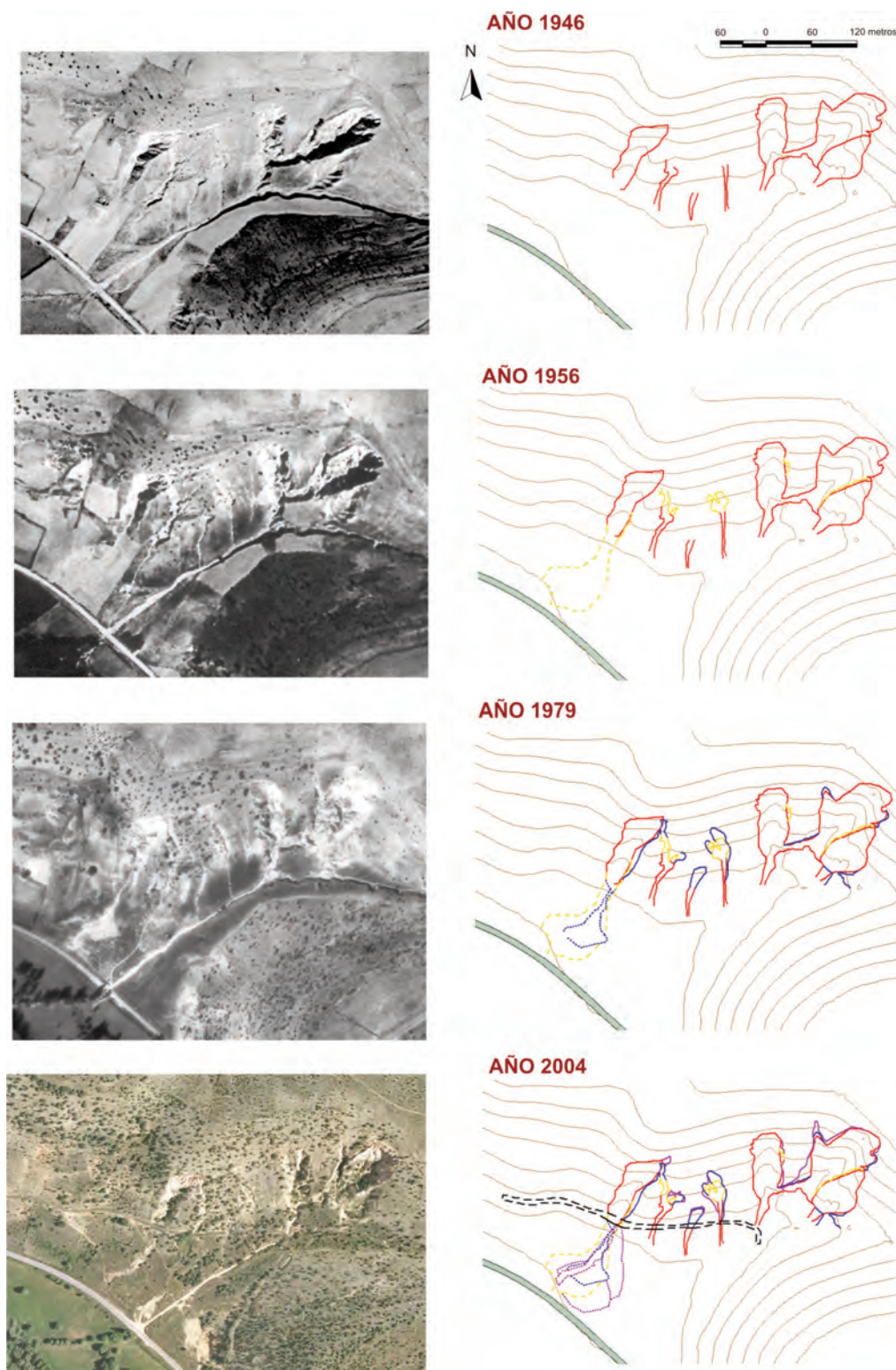


Fig. 10.—Evolución del contorno de las cárcavas para el Área 1-Pedraza, establecida a partir de la interpretación de la sucesión de fotografías aéreas verticales correspondiente a los años 1946, 1956 y 1979, y de la ortoimagen de 2004. Véase leyenda (Fig. 14).

—Evolution of the outline of the gullies for the Area 1-Pedraza, established through the interpretation of the sequence of multi-temporal aerial photographs (1946, 1956 y 1979) and 2004 ortoimage. See Fig. 14 for the legend.

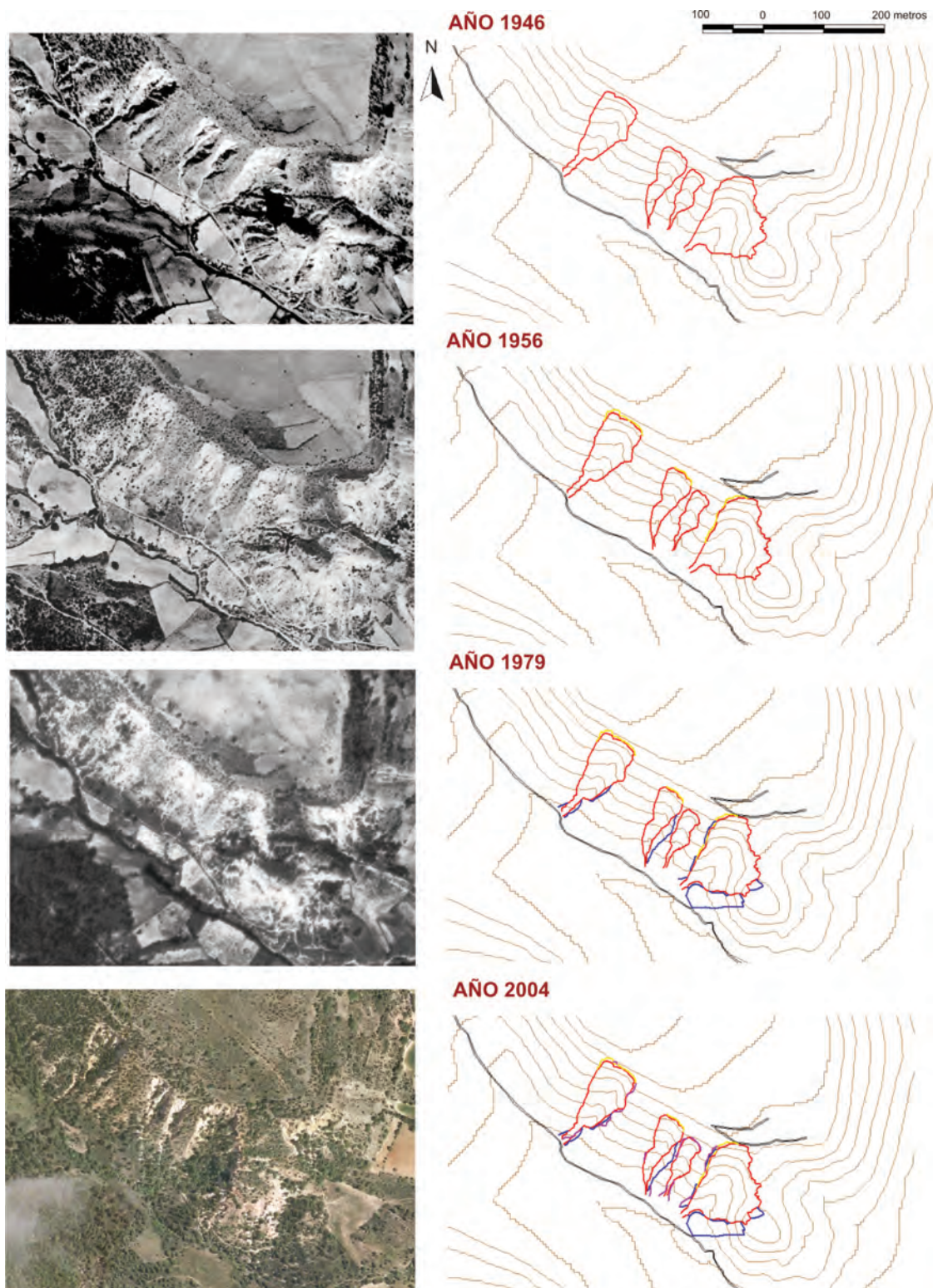


Fig. 11.—Evolución del contorno de las cárcavas para el Área 2-Arahuetes, establecida a partir de la interpretación de la sucesión de fotografías aéreas verticales correspondiente a los años 1946, 1956 y 1979, y de la ortoimagen de 2004. Véase leyenda (Fig. 14).

—Evolution of the outline of the gullies for the Area 2-Arahuetes, established through the interpretation of the sequence of multi-temporal aerial photographs (1946, 1956 y 1979) and 2004 ortoimage. See Fig. 14 for the legend.

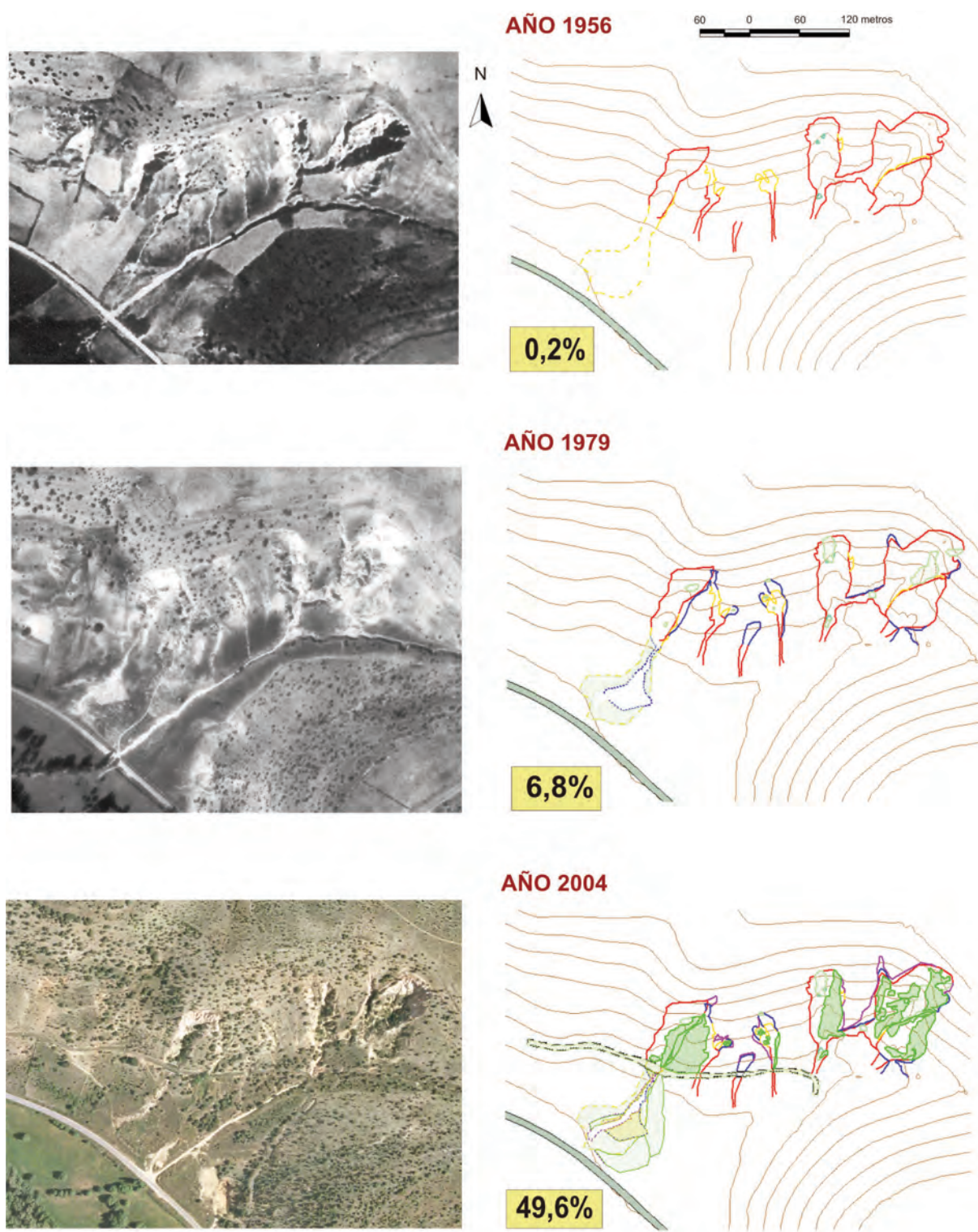


Fig. 12.—Evolución de la superficie del interior de las cárcavas colonizada por vegetación del Área 1-Pedraza, establecida a partir de la interpretación de la sucesión de fotografías aéreas verticales de 1946, 1956 y 1979, y de la ortoimagen de 2004. Véase Fig. 14 para leyenda.

—Evolution of the area colonized by vegetation at the interior of the gullies for the Área 1-Pedraza, established through the interpretation of the sequence of multi-temporal aerial photographs (1946, 1956 y 1979) and 2004 ortoimage. See Fig. 14 for legend.

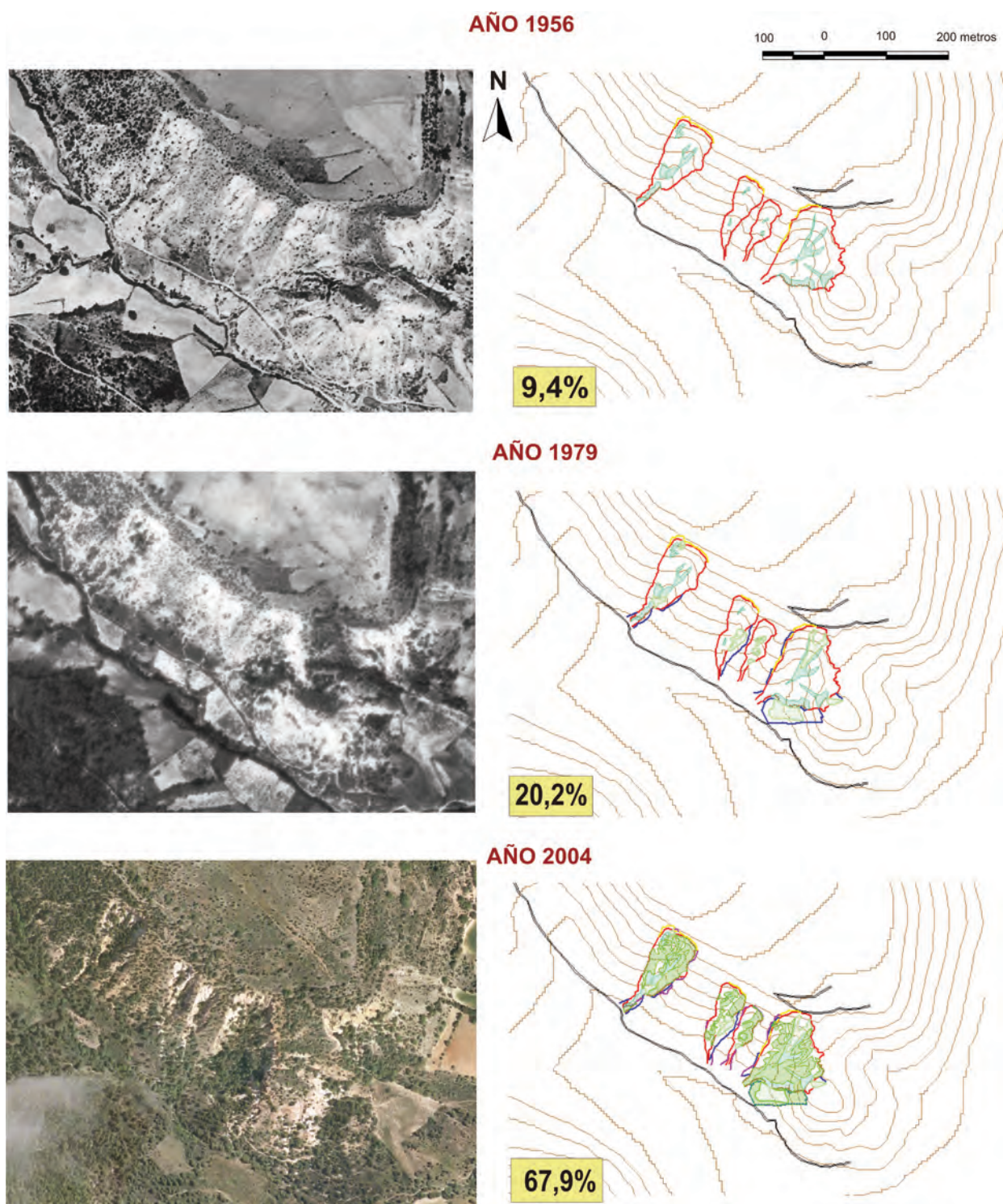


Fig. 13.—Evolución de la superficie del interior de las cárcavas colonizada por vegetación del Área 2-Arahuetes, establecida a partir de la interpretación de la sucesión de fotografías aéreas verticales de 1946, 1956 y 1979, y de la ortoimagen de 2004. Véase Fig. 14 para leyenda.

—Evolution of the area colonized by vegetation at the interior of the gullies for the Área 2-Arahuetes, established through the interpretation of the sequence of multi-temporal aerial photographs (1946, 1956 y 1979) and 2004 ortoimage. See Fig. 14 for legend.



Fig. 14.–Leyenda correspondiente a las figuras 10, 11, 12 y 13.
 –Legend for the figures 10, 11, 12 y 13.



Fig. 15.–Influencia de la orientación de la ladera en el desarrollo de la vegetación en el interior de las cárcavas.
 –Influence of the aspect of the slope on the development of the vegetation inside the gullies.

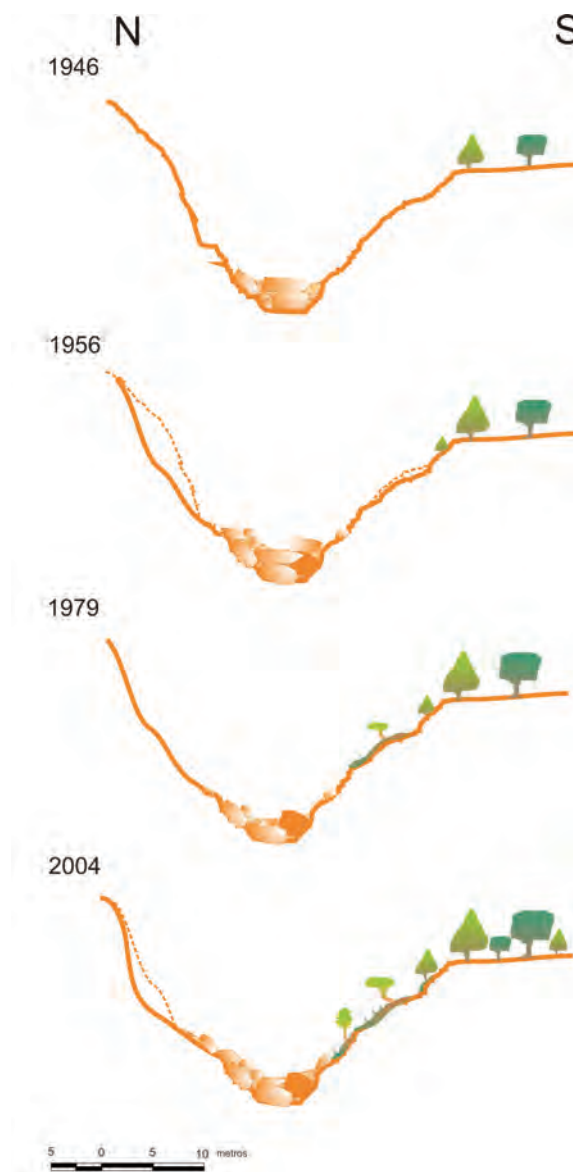


Fig. 16.–Esquema de evolución típica de las cárcavas sobre arenas silíceas del entorno de Pedraza, obtenida a través de la información ofrecida por las fotografías aéreas verticales de 1946, 1956, 1979 y ortoimágenes de 2004. Corte transversal en dirección norte-sur en una cárcava tipo. Ver texto para su explicación.

–Scheme showing the evolutionary pattern for the silica sand gullies of the Pedraza region, obtained from the multi-temporal aerial photographs of 1946, 1956, 1979 and 2004 ortoimages. Transverse cut in a northern-southern direction for a typical gully. See text for its explanation.